

Felipe Nalin Ely

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA DOS
ENSAIOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS ELÉTRICAS DO
LABMAQ TENDO COMO OBJETIVO A QUANTIFICAÇÃO
DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso
submetido ao Curso de Graduação
em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau
de Bacharel em Engenharia
Elétrica
Orientador: Prof. Renato Lucas
Pacheco, Dr.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ely, Felipe Nalin

ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA DOS
ENSAIOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS ELÉTRICAS DO LABMAQ
TENDO COMO OBJETIVO A QUANTIFICAÇÃO DAS INCERTEZAS
DE MEDIÇÃO / Felipe Nalin Ely ; orientador, Renato
Lucas Pacheco, 2018.

73 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

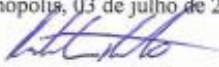
1. Engenharia Elétrica. 2. Máquinas elétricas.
3. Metrologia. 4. Estimação de incertezas. I.
Pacheco, Renato Lucas. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica.
III. Título.

Felipe Nalin Ely

**ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO TRIFÁSICA DOS
ENSAIOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS ELÉTRICAS DO
LABMAQ TENDO COMO OBJETIVO A QUANTIFICAÇÃO
DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 03 de julho de 2018.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Carlos Alberto Livramento, M.Sc.
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Hans Helmut Zurn, Ph.D.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos que de uma maneira ou outra me ajudaram a ser quem eu sou e a chegar onde cheguei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família, por ser o meu porto seguro, me dando educação, suporte, amor durante todo o meu caminho.

Aos meus amigos, colegas, que de uma forma ou outra, contribuíram para o meu crescimento, graduação e para que a vida fosse mais leve.

A Taíse, minha namorada, por ser um ponto de luz na minha vida.

Ao professor Dr. Renato Lucas Pacheco, por ter aceitado ser meu orientador, e aos professores que passaram por toda graduação pelo conhecimento transmitido, em especial, aos professores desta banca.

Por fim agradeço a Deus, pelo dom da vida.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Agradeço ao Técnico do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ/EEL), Cristian Franzoi Mazzola, a orientação recebida quando da execução dos experimentos, na coleta e no tratamento dos dados obtidos no citado laboratório, bem como o seu apoio na parte escrita deste Trabalho de Conclusão de Curso.

“Aquilo que não se pode medir, não se pode
melhorar”.
(William Thomson, 1883)

RESUMO

Fundamentado na metrologia, ciência que abrange todos os aspectos práticos e teóricos relativos à medição, este trabalho visa aplicar os conceitos metrológicos com o objetivo de poder mensurar de maneira quantitativa, os erros associados em ensaios de máquinas síncronas e assíncronas através de medições de grandezas elétricas em bancadas didáticas, localizadas no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAQ/CTC/UFSC). A bancada, bem como, os multimedidores elétricos e seus periféricos, são examinados cuidadosamente sob aspectos construtivos e modo de operação na realização de cada ensaio. São levantados e apresentados os métodos tradicionais de ensaios em máquinas elétricas rotativas: motores de indução e geradores síncronos e, então, determinados os erros propagados pelo sistema de medição para a quantificação da incerteza das medições de cada ensaio.

Palavras-chave: Estimação de incertezas 1. Máquinas elétricas 2. Metrologia 3.

ABSTRACT

Based on metrology, a science that encompasses all practical and theoretical aspects related to measurement, this work aims to apply the metrological concepts in order to be able to quantitatively measure the errors associated with the testing of synchronous and asynchronous machines by measuring electrical quantities (LABMAQ / CTC / UFSC) in the didactic workbenches located at the Laboratory of Electrical Machines and Drives of the Federal University of Santa Catarina. The bench, as well as electrical multimeters and their peripherals, are carefully examined under constructive aspects and mode of operation in carrying out each test. The traditional methods of testing in rotary electric machines: induction motors and synchronous generators, and then determining the errors propagated by the measurement system for the quantification of the uncertainty of the measurements of each test are presented and presented.

Keywords: Estimation of uncertainties 1. Electric machines 2. Metrology 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição Normal ou Gaussiana	28
Figura 2 - Limites da Distribuição.....	31
Figura 3 - Interface do Medidor de Frequência	36
Figura 4 - Motor Trifásico de Indução (Rotor Bobinado)	37
Figura 5 - Máquina Síncrona-Gerador.....	37
Figura 6 - Bancada Didática.....	38
Figura 7 - <i>Varivolt</i>	31
Figura 8 - Reostato	39
Figura 9 - Multimetro MMW01-M	40
Figura 10 - Sensor de Tensão DELTA sem TP	41
Figura 11 - Ligação a 3 TCs	42
Figura 12 - Circuito Elétrico Equivalente por Fase de um Motor de Indução	44
Figura 13 - Circuito Elétrico Equivalente por Fase, com as Perdas do Rotor e as Perdas do Núcleo separadas.....	46
Figura 14 - Curva de Perdas Rotacionais	47
Figura 15 - Circuito Elétrico Equivalente da Máquina Síncrona	48
Figura 16 - A Característica a Vazio (CAV) de um Gerador Síncrono.....	49
Figura 17 - Característica de Curto-Circuito	50
Figura 18 - Característica a Vazio - Máquina Fria	52
Figura 19 - Característica a Vazio - Máquina aquecida.....	53
Figura 20 - Característica de Curto-Circuito - Máquina Fria	55
Figura 21 - Característica de Curto-Circuito - Máquina Aquecida	56
Figura 22 - Linha de Entreferro - Máquina Fria	57
Figura 23 - Linha de Entreferro - Máquina Aquecida	57
Figura 24 - Curva de Perdas Rotacionais - Máquina Fria.....	60
Figura 25 - Curva de Perdas Rotacionais - Máquina Aquecida..	62
Figura 26 - Ensaio de Validação - Gerador Síncrono.....	65
Figura 27 - Ensaio de Validação – Motor de Indução	65
Figura 28 - Curva de Perdas Rotacionais - Validação.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades de Base do SI.....	22
Tabela 2 - Intervalos de Confiança.....	31
Tabela 3 - Tabela de Distribuição Empírica de Reatâncias de Dispersão em Motores de Indução	45
Tabela 4 - Ensaio a Vazio - Máquina Fria.....	52
Tabela 5 - Ensaio a Vazio - Máquina Aquecida.....	53
Tabela 6 - Ensaio de Curto – Circuito - Máquina Fria	54
Tabela 7 - Ensaio de Curto-Circuito - Máquina Aquecida	55
Tabela 8 - Valores com Máquina Fria	58
Tabela 9 - Valores com Máquina Aquecida	58
Tabela 10 - Ensaio Rotor Travado - Máquina Fria.....	59
Tabela 11 - Ensaio Rotor Travado - Máquina Aquecida	59
Tabela 12 - Valores Médios - Máquina Fria.....	59
Tabela 13 - Valores Médios - Máquina Aquecida.....	60
Tabela 14 - Ensaio a Vazio - Máquina Fria.....	61
Tabela 15 - Ensaio a Vazio - Máquina Aquecida.....	61

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo geral	18
1.2.2	Objetivos específicos	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	METROLOGIA	21
2.1.1	Sistema de Unidades Padrão	22
2.1.2	Conceitos.....	23
2.1.3	Incertezas de uma medida.....	24
2.1.4	Algarismos significativos.....	24
2.1.5	Operações aritméticas	25
2.1.6	Regras de arredondamento.....	25
2.1.7	Erros ou desvios.....	25
2.1.8	Desvio-padrão	28
2.1.9	Intervalo de confiança.....	30
2.2	LEI DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS.....	31
2.2.1	Grandezas de entrada não correlacionadas	31
2.2.2	Grandezas de entrada correlacionadas	32
3	APRESENTAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS	35
3.1	BREVE APRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	35
3.2	MULTIMEDIDOR.....	39
4	ENSAIOS EM MÁQUINAS ROTATIVAS ELÉTRICAS 43	
4.1	MOTOR DE INDUÇÃO.....	43
4.1.1	Ensaio de rotor travado (ou bloqueado).....	43
4.1.2	Ensaio a Vazio	45

4.2	MÁQUINA SÍNCRONA – GERADOR	48
4.2.1	Ensaio a vazio (ou sem carga).....	48
4.2.2	Ensaio de curto-circuito	49
5	ENSAIOS PRÁTICOS E VALIDAÇÃO.....	51
5.1	ENSAIO MÁQUINA SÍNCRONA.....	51
5.1.1	Ensaio a vazio (ou sem carga).....	51
5.1.2	Ensaio de curto-circuito	54
5.1.3	Linha do entreferro	56
5.2	ENSAIO DO MOTOR TRIFÁSICO DE INDUÇÃO..	58
5.2.1	Ensaio de rotor travado (bloqueado).....	58
5.2.2	Ensaio a Vazio (ou sem carga).....	60
5.3	INCERTEZAS	62
5.3.1	Gerador síncrono.....	62
5.3.2	Motor de indução trifásico	63
5.3.3	Perdas.....	64
5.4	VALIDAÇÃO	64
6	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXO A	71
	ANEXO B	73

1. INTRODUÇÃO

Alavancadas pelo desenvolvimento tecnológico, as grandes transformações ocorridas no cenário mundial dos últimos anos e a busca incessante por inovação em diferentes áreas do conhecimento elevaram a necessidade de aperfeiçoamento dos sistemas de medição. Sendo evidente a constante presença de sistemas de medição no cotidiano e na rotina de trabalho, é notória a sua importância nos ramos que tangem a engenharia elétrica como, por exemplo, o ramo industrial e científico.

A qualidade de processos e produtos em um ambiente competitivo como o industrial sugere um grau de confiabilidade bastante expressivo. O mesmo é visto no campo científico, onde investigações podem comprovar novas teorias e refutar outras com pequenas diferenças nas medidas. Isso acaba se tornando um desafio quando é percebido que todas as medições são afetadas por erros.

Diante deste contexto, é de extremo interesse compreender e analisar as incertezas para que elas não sejam prejudiciais de maneira a comprometer os resultados e suas aplicações.

Com a finalidade de atestar a confiabilidade dos resultados das medições de grandezas elétricas das bancadas didáticas do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAQ/EEL/CTC/UFSC), este trabalho propõe-se a quantificar as incertezas das medições a partir da análise do sistema de medição de grandezas elétricas e estudo dos ensaios tradicionais em máquinas elétricas rotativas, aplicando os conceitos da metrologia.

1.1 MOTIVAÇÃO

O Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAQ/EEL/CTC/UFSC) proporciona aos discentes o contato com equipamentos amplamente utilizados na indústria. Atendendo as disciplinas de conversão eletromecânica A e B e acionamentos elétricos, o laboratório conta com diversos tipos de máquinas elétricas. Máquinas de indução, síncronas, de corrente contínua, conjuntos de transformadores, conversores de frequência, entre outros, são utilizados para que sejam analisados os comportamentos dessas máquinas. Por meio de ensaios experimentais, são feitas medições para que sejam examinados esses comportamentos.

A metrologia, definida como a “ciência da medição”, tem como foco principal prover confiabilidade, credibilidade, universalidade e qualidade às medidas. Como as medições estão presentes, direta ou

indiretamente, em praticamente todos os processos de tomada de decisão, a abrangência da metrologia é imensa. (FERNANDES; COSTA NETO; SILVA, 2009).

Isto posto, fazendo uso da metrologia, deve-se investigar as incertezas que são geradas no processo de medição dos ensaios experimentais, considerando a metodologia empregue nos ensaios, o sistema de medição, a fim de garantir que os resultados apresentem a confiabilidade e credibilidade necessária.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é estimar quantitativamente as incertezas do sistema de medição de grandezas elétricas utilizado no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos da Universidade Federal de Santa Catarina (LABMAQ/CTC/UFSC).

1.2.2 Objetivos específicos

- Elucidar a ciência da medição, metrologia, que será aplicada neste trabalho
- Analisar o sistema de medição da bancada que é composta pelo multimedidor elétrico e seus periféricos, apresentando os seus aspectos construtivos e modo de funcionamento.
- Apresentar os métodos de ensaio tradicionais em máquinas rotativas elétrica.
- Avaliar os erros e mensurar as incertezas.
- Comparar os resultados com um instrumento de medição de alta exatidão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho é dividido em capítulos, conforme descrição a seguir.

O capítulo 1 faz a apresentação e a motivação, apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos e apresenta a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 faz uma revisão de metrologia e suas características principais.

O capítulo 3 faz a apresentação da bancada didática uma breve apresentação dos equipamentos utilizados.

O capítulo 4 aponta os ensaios tradicionais feitos em máquinas rotativas elétricas.

No capítulo 5 são exibidos os resultados dos ensaios práticos, feita a estimação de incertezas, apresentados e analisados os valores obtidos.

A conclusão é exposta no capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 METROLOGIA

Impensável nos dias de hoje não se deparar cotidianamente com situações onde são apresentadas inúmeras medidas. Saber com qual velocidade o carro se desloca, a temperatura local, o peso dos alimentos no supermercado, o volume de água consumido no mês e o gasto de energia são todas situações que apresentam algo em comum, isto é, são concebidas por meio de medições.

A Metrologia é a ciência que abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza em qualquer campo da ciência ou tecnologia (VIM, 2012).

Medições são efetuadas com muita naturalidade em praticamente todos os ramos da atividade humana. A agricultura, pecuária, o comércio, a indústria e o setor de serviços não poderiam existir na forma como hoje são conhecidos sem que medições confiáveis fossem efetuadas (ALBERTAZZI G. JR; SOUSA, 2008).

As medições podem ser usadas, dependendo das necessidades, de diversas maneiras. É possível utilizar as medições para observar e registrar os valores de uma grandeza, se atendo ao valor momentâneo, ao acumulado e nas suas alterações no decurso de tempo como, por exemplo, na medição de energia elétrica. É possível, valendo-se das medições, manter uma grandeza em valores predefinidos como, por exemplo, no controle de temperatura de refrigeradores domésticos. A medição pode ser empregada como geradora conhecimentos nas mais diversas áreas da ciência e indústria. Na área de pesquisa é onde se demanda mais das medições, pois quaisquer pequenas diferenças podem refletir em novos conhecimentos. Ainda relacionada ao conhecimento, pode ser empregue nas instituições de ensino como suporte para explicitar a teoria e ajudar a desenvolver o processo de construção do conhecimento dos discentes.

Conforme Silva, Monteiroa e Vasconcelos (2007,p16), pesquisar e investir na qualidade da formação profissional de nível técnico em metrologia resultará em importantes benefícios para o pleno atendimento às demandas do setor produtivo e, conseqüentemente, alavancará o seu desenvolvimento.

Devido à sua influência e ao seu alcance, é relevante dar importância tanto para a qualidade e confiabilidade, quanto para uma maneira de tornar de fácil acesso e entendimento as medidas de tais grandezas.

2.1.1 Sistema de Unidades Padrão

A palavra grandeza, do latim *grandis*, refere-se a tudo que é suscetível de avaliação. No caso em que esta avaliação pode ser realizada com instrumentos e expressa em padrões previamente definidos e aceitos pela comunidade científica, são denominadas grandezas físicas. (STEFFENS; VEIT; SILVEIRA, 2008).

Visando padronizar as unidades de diversas grandezas físicas, facilitando assim a sua utilização e relações comerciais, foi criado um sistema onde, para cada grandeza de base, seria atribuída uma unidade.

Criado em 1971 na 14ª Conferência Geral sobre Pesos e Medidas, o Sistema Internacional de Unidades (SI) definiu as grandezas físicas fundamentais ou de base como sendo o comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de substância e intensidade luminosa. Por consequência, suas unidades de base também foram definidas.

Tabela 1 - Unidades de Base do SI

Grandeza de base		Unidade de base do SI	
Nome	Símbolo	Nome	Símbolo
comprimento	$l, x, r, \text{ etc.}$	metro	m
massa	m	kilograma	kg
tempo, duração	t	segundo	s
corrente elétrica	I, i	ampere	A
temperatura termodinâmica	T	kelvin	K
quantidade de substância	n	mol	mol
intensidade luminosa	I_v	candela	cd

Fonte: SI, 2012

Alicerçado em tais definições e em uma série de equações que as relacionam, foram estabelecidas todas as outras grandezas. A essas grandezas se deu o nome de grandezas derivadas e suas unidades chamadas de unidades derivadas.

A relevância da padronização é possível de ser apurada quando se pensa na globalização dos dias atuais, onde produtos são concebidos para funcionar além das fronteiras.

2.1.2 Conceitos

Para uma melhor compreensão do assunto, serão explanados os conceitos fundamentais da metrologia. Esses conceitos estão de acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia – VIM, vocabulário esse que visa promover uma adequação na nomenclatura dos termos relacionados à metrologia, partindo do processo fundamental da metrologia até a sua aplicação.

Medir é o processo experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente. (ALBERTAZZI G. JR.; SOUSA, 2008).

O ato ou efeito de medir é chamado de medição. A medição, por consequência, implica na comparação de grandezas e engloba a quantidade de entidades, não podendo ser aplicada em propriedades qualitativas.

Mensurando é o nome dado à grandeza específica submetida à medição, o objeto a ser medido. Após feita a medição do mensurando, o valor numérico, acompanhado de sua unidade resultante é denominado de medida.

Existem dois modos de se obter medições, as medições diretas e as medições indiretas. As medições diretas são realizadas fazendo a comparação da grandeza que se quer medir com uma unidade ou padrão. Ao fazer a medição do comprimento de algum objeto com uma régua, tem-se um exemplo de medição direta. Medição indireta é o modo onde é feita a medida de uma grandeza diferente da que se pretende conhecer e, por meio de relações, se encontra a grandeza de interesse. Um exemplo de medição indireta é a medição de corrente por meio da tensão em um resistor com valor conhecido, utilizando a lei de Ohm.

Os dois modos são frequentemente utilizados, sendo sua escolha baseada em critérios que passam da dificuldade de se medir diretamente, o tempo gasto para que seja feita a medida e a precisão do instrumento ou do sistema de medição. Independente da definição, é inevitável que a medida apresente incertezas. Para tanto, deve-se minimizá-las e compreendê-las, para que não sejam prejudiciais aos propósitos da medida.

2.1.3 Incertezas de uma medida

A premissa básica da metrologia é: *nenhuma medição é sem erro*. Ou, na lógica positiva: *toda medição possui erro*. (RIBEIRO, 1999, p35). Toda e qualquer medida nunca representa o valor verdadeiro da grandeza, pois não é possível medir uma grandeza física com precisão absoluta, já que este valor nunca é conhecido com total certeza. O valor verdadeiro ou valor do mensurado só seria encontrado se a medição da grandeza fosse feita de maneira perfeita, com instrumentos perfeitos, um operador perfeito, no local perfeito e que o mensurando fosse completamente definido e estável.

Os instrumentos de medição, ou sistemas de medição por conta de aspectos tecnológicos: suas características construtivas, funcionamento, entre outros, não se comportam de maneira ideal. Alterações nas condições ambientais na temperatura, pressão, umidade também podem implicar mais ou menos, tanto no sistema de medição, como no mensurando e o operador também está suscetível a desacertos no procedimento de medição.

Assim sendo, é necessário saber com que confiança o valor resultante representa a grandeza física antes de utilizá-lo ou registrá-lo. O valor obtido deve ser expresso com a incerteza da medida e indispensavelmente, associada a um erro ou desvio.

2.1.4 Algarismos significativos

A incerteza da medida deve ser sempre apresentada para que seja possível saber a confiança do valor encontrado e acaba sendo refletida na quantidade de algarismos com que se pode escrever a medida de maneira compatível. Quando a incerteza decorre a partir de várias medições, o erro de uma medida é chamado de incerteza padrão do tipo “A”, que é o desvio-padrão determinado por métodos estatísticos. Esses métodos serão esmiuçados no decorrer do texto. Para uma só medição, a incerteza é classificada de incerteza padrão do tipo “B”, que é a incerteza obtida por qualquer método que não seja o estatístico.

Para incertezas do tipo “B” a incerteza de medição pode ser estimada como sendo a metade da menor divisão da escala do equipamento utilizado ou uma fração da menor divisão da escala. Sendo uma avaliação visual, feita mentalmente por quem realiza a medição, a escolha desta incerteza fica a cargo de quem realiza a medição.

Algarismos Significativos = Algarismos Corretos + Primeiro Algarismo Duvidoso

2.1.5 Operações aritméticas

Após expressar de maneira correta as medidas, com os algarismos significativos coerentes, é possível que seja necessário utilizar tais números para efetuar cálculos. Para realizar tais operações é necessário que se obedecem algumas regras.

Para adição e subtração de números que contenham algarismos significativos, deve-se alinhar as casas decimais, sendo completados com zero os valores com número inferior de número significativos. Após realizada a operação, o resultado deve apresentar o número significativo do elemento com menor precisão. Assim como na adição e subtração, na divisão e multiplicação o resultado deve apresentar o número significativo do elemento com menor precisão.

2.1.6 Regras de arredondamento

É imprescindível arredondar os resultados encontrados e para isso deve-se obedecer às seguintes convenções: os algarismos de 1 a 4 são arredondados para baixo e o algarismo antecedente segue inalterado. Os algarismos entre 6 e 9 são arredondados para cima e o algarismo precedente é incrementado em 1. Para o algarismo 5, se o valor antecedente for par, ele é arredondado para baixo e, se o valor antecedente for ímpar, ele é arredondado para cima.

2.1.7 Erros ou desvios

Mesmo que seja inevitável remover em sua totalidade os erros das medições, eles não podem ser desprezados. Porém, é possível, a partir de sua compreensão e atenuação, obter medições confiáveis e satisfatórias. Esses erros podem ser divididos em duas classificações: erros sistemáticos e erros aleatórios.

Para Albertazzi e Sousa, 2008, o erro sistemático corresponde ao valor médio do erro de medição. O erro aleatório é a parcela imprevisível do erro de medição, responsável pelas variações encontradas em medições repetidas.

Os erros sistemáticos são aqueles que se repetem quando uma série de medições é feita nas mesmas condições. Implicam nesse erro

condições ambientais como temperatura, pressão, umidade, técnicas do experimentador e aspectos construtivos do instrumento de medição. Em especial, tem-se o erro sistemático residual. Geralmente exposto no manual ou mesmo no instrumento, ele informa o quão errôneas são as medidas e tem influência, por exemplo, da calibração.

Fazendo medições repetitivas de um mensurado com valor verdadeiro conhecido, é possível estimar o valor do erro sistemático. Essa estimativa é tão melhor quanto maior for a quantidade de medições e é dada por (2.1):

$$Es = \bar{I}_{\infty} - VV \quad (2.1)$$

Em (2.1), Es é o valor do erro sistemático, \bar{I}_{∞} é o valor médio de uma quantidade infinita de medições e VV é o valor verdadeiro do mensurado.

Para Albertazzi e Sousa, 2008, essa estimativa não é muito útil porque:

(a) não há tempo para efetuar infinitas medições e calcular sua média e

(b) não se conhece exatamente o valor do mensurado.

Por conta disso, de modo geral, é feita uma estimativa do erro sistemático, chamada de tendência.

A tendência leva em consideração um valor médio de medições finitas e o valor estimado do valor verdadeiro, chamado de valor verdadeiro convencional.

Tem-se então:

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (2.2)$$

Em (2.2), Td é a tendência, \bar{I} é o valor médio de uma quantidade finita de medições e VVC é o valor verdadeiro convencional.

Com o valor da tendência é possível compensar o erro sistemático de um sistema de medição.

$$C = -Td. \quad (2.3)$$

Sendo C o valor da correção, ele deve ser adicionado ao valor de cada medida feita pelo instrumento ou sistema de medição. Como exemplo, pode-se pegar um velocímetro com o ponteiro torto e que indica 10 km/h a mais em cada medição. A tendência Td é igual a 10 km/h. Em

cada medição deve-se, então, acrescentar o valor de C que neste caso é de - 10 km/h.

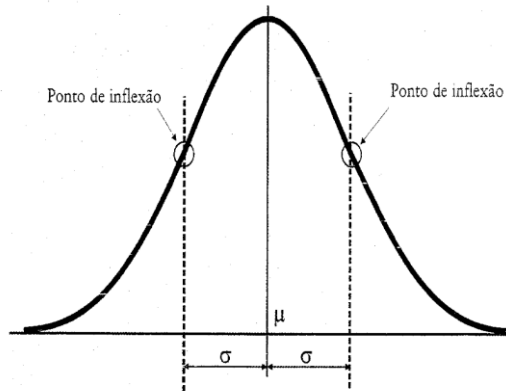
Mesmo que sejam minimizados os erros sistemáticos, ainda são encontrados nas medições os erros aleatórios (ou estatísticos). Esse tipo de erro existe mesmo quando todas as discrepâncias sistemáticas num processo de mensuração são minimizadas, balanceadas ou corrigidas. Diversos fatores contribuem para o surgimento do erro aleatório. A existência de folgas, atrito, vibrações, as condições ambientais, variações de tensão, contribuem para o aparecimento deste tipo de erro, que gera variações imprevisíveis nas medidas. Os erros aleatórios jamais podem ser eliminados por completo.

Por ser imprevisível e não ser possível eliminá-lo, é então interessante analisar a faixa em torno do valor médio onde o erro aleatório ocorre. A faixa onde ele é previsto, é chamada de repetitividade. A repetitividade é influenciada pela exatidão. Segundo o VIM , 2012, define-se precisão como sendo o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo objeto ou em objetos similares, sob condições especificadas e exatidão como sendo o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro dum mensurando. Em resumo, medições precisas apresentam pouca dispersão e a exatidão refere-se ao quanto elas se aproximam do valor correto.

Para Albertazzi e Sousa, 2008, o comportamento aleatório pode ser bem representado por uma distribuição normal ou gaussiana. Desta forma, para grandes quantidades de medições, as probabilidades de cada resultado acontecer são as mesmas.

Na imagem da figura 1 pode-se ver os parâmetros da distribuição normal.

Figura 1 - Distribuição Normal ou Gaussiana



Fonte: ALBERTAZZI E SOUSA, 2008

Na figura 1, μ é a média, σ é o desvio-padrão, que será discutido a seguir, e o ponto de inflexão é o ponto onde a curvatura troca de sinal.

2.1.8 Desvio-padrão

Na definição de incerteza de medição do VIM (2012) faz-se a observação de que o parâmetro pode ser, por exemplo, um desvio-padrão denominado incerteza-padrão (ou um de seus múltiplos) ou a metade da amplitude de um intervalo tendo uma probabilidade de abrangência determinada. Para um conjunto de medições repetidas, a incerteza-padrão equivale ao desvio-padrão da amostra.

O desvio-padrão mencionado é uma medida do grau de dispersão de uma distribuição de valores encontrados em uma população de medidas. Quanto maior for o número de medições repetidas, melhor o desvio-padrão representará a margem de erro presente na população. Como não é viável fazer um número de medições infinitas, o desvio-padrão amostral, desvio médio quadrático ou ainda desvio experimental apresenta, utilizando um número finito de medições repetidas uma estimativa do desvio-padrão. É definido como sendo a raiz quadrada da variância amostral e descrito por (2.4):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2.4)$$

Esse desvio-padrão amostral apresenta uma boa avaliação quanto à distribuição de medidas em torno do valor médio.

Correlacionado com a incerteza, está o grau de liberdade que reflete o grau de segurança com a qual a estimativa do desvio-padrão é conhecida e se dá pelo valor do número de medições menos um, conforme (2.5).

$$v = N - 1 \quad (2.5)$$

Para valores conhecidos do desvio-padrão, esse grau é considerado infinito.

Erros sistemáticos e aleatórios provavelmente estarão alterando o resultado de uma única medição. Por meio da correção, é possível corrigir os erros sistemáticos, mas os erros aleatórios, por serem imprevisíveis, não são factíveis de ser extintos, por mais que seja possível delimitar uma faixa na qual eles estão presentes. Como o erro aleatório de medidas individuais é maior do que o erro da média das medidas, o cálculo do desvio-padrão da \bar{x} média, faz com que o erro aleatório seja menor, afetando menos as medidas.

$$\sigma_m \cong \sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N(N - 1)}} \quad (2.6)$$

Esta expressão é resultado da relação entre o desvio-padrão das médias de “N” indivíduos com o desvio-padrão dos indivíduos e é dada por:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{N}} \quad (2.7)$$

Com isso, o desvio-padrão é reduzido proporcionalmente com o inverso da raiz quadrada do número de medições. Assim,

$$\sigma_{\bar{x}} < \sigma \quad (2.8)$$

Deve ser levado em consideração que o tempo gasto para se fazer uma grande quantidade de medições não compensa o resultado. Desta forma, devem ser analisadas as circunstâncias da medição, pois pode ser mais vantajoso fazer uma série de medições cuidadosas para garantir a qualidade do resultado ao invés de muitas, se apegando na relação.

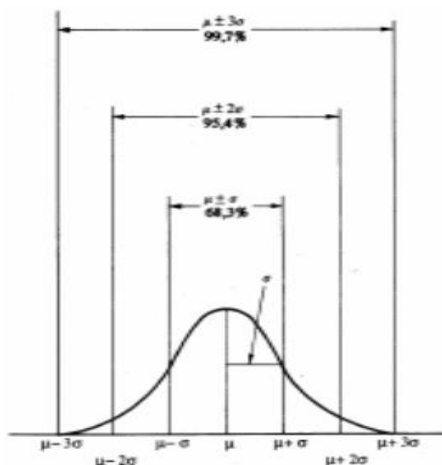
Com isso, o resultado de uma série de N medições pode ser descrita como:

$$x = \bar{x} \pm \sigma_{\bar{x}} \quad (2.9)$$

2.1.9 Intervalo de confiança

O desvio-padrão σ propicia quantificar a qualidade das medidas por meio de intervalos. A partir dele, é possível apurar qual a probabilidade de se encontrar as medidas nos determinados intervalos, conforme os desvios se distanciam do valor médio, analisando a sua área, como visto na imagem da figura 2 e que representam a repetitividade antes citada.

Figura 2 - Limites da Distribuição



Fonte: RIBEIRO, 1999

Com ela, é possível montar a tabela 2.

Tabela 2 – Intervalos de Confiança

Intervalo	Fator de confiança	Probabilidade
$[-\sigma, +\sigma]$	$\alpha = 0,683$	68,3%
$[-2\sigma, +2\sigma]$	$\alpha = 0,954$	95,4%
$[-3\sigma, +3\sigma]$	$\alpha = 0,997$	99,7%

Fonte: RIBEIRO, 1999

Os dados da tabela 2 indicam que 99,7% de todas as aleatoriedades ficam na faixa $\{\bar{x} \pm 3\sigma\}$, valores fora dessa faixa são comumente considerados engano e não erros.

2.2 LEI DE PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS.

2.2.1 Grandezas de entrada não correlacionadas

Por mais que se queira medir uma grandeza y de interesse, na maioria das vezes as medições são feitas de maneira indireta, por meio de uma grandeza primária (de entrada) x . y pode ser denominada grandeza

de saída e pode ser representada por $y = (x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n)$, sendo n o número de medidas. Quando as entradas são independentes, diz-se que elas são não correlacionadas.

Utilizando aproximações e muitas medidas (amostras), pode-se admitir que o valor médio seja considerado o valor verdadeiro. Da mesma forma, a incerteza padrão pode ser considerada como o desvio padrão verdadeiro. A partir do desenvolvimento matemático apropriado, tem-se uma expressão para o cálculo da incerteza padrão da grandeza de saída. Segundo o GUM, 2008, a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$, que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2.10)$$

As derivadas parciais $(\partial f / \partial x_i)$ calculadas no ponto x_i são denominadas coeficientes de sensibilidade.

Essa expressão é utilizada quando grandezas de entrada podem ser medidas diversas vezes. Com maiores quantidades de medidas é possível obter valores médios e desvios padrões das médias. Com as equações que relacionam as grandezas somadas aos valores médios e desvios padrões das médias é possível utilizar a expressão (2.10).

2.2.2 Grandezas de entrada correlacionadas

Para grandezas de entradas interdependentes, as correlações devem ser levadas em consideração. De acordo com o GUM, 2008, quando as grandezas de entrada são correlacionadas, a expressão apropriada para a variância combinada $u_c^2(y)$ associada com o resultado de uma medição é:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (2.11)$$

onde $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada associada com x_i e x_j . O grau de correlação entre x_i e x_j é caracterizado pelo coeficiente de correlação estimado.

$$r(x_i, x_j) = \frac{u(x_i, x_j)}{u(x_i)u(x_j)} \quad (2.12)$$

onde $r(x_i, x_j) = r(x_j, x_i)$ e $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq +1$. Se as estimativas x_i e x_j são independentes, $r(x_i, x_j) = 0$ e a variação numa delas não implica uma variação esperada na outra.

Em termos de coeficientes de correlação, que são mais prontamente interpretados do que covariâncias, o termo de covariância de (2.11) pode ser escrito como:

$$2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (2.13)$$

Assim, (2.11) torna-se,

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i)u(x_j)r(x_i, x_j) \quad (2.14)$$

com $C_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$ e $C_j = \frac{\partial f}{\partial x_j}$.

3 APRESENTAÇÃO DA BANCADA DE ENSAIOS

O Laboratório de Máquinas e Acionamento Elétricos do EEL possui, entre os diversos dispositivos, equipamentos e máquinas elétricas, uma bancada didática. Utilizada para uma melhor compreensão do funcionamento de alguns tipos de máquinas elétricas rotativas, a partir dela são acionadas, controladas e medidas as grandezas de uma máquina síncrona (gerador), assim como de motores de indução trifásicos com rotor bobinado e rotor gaiola de esquilo.

O sistema de medição utilizado pela bancada é composto por um multimetror elétrico microprocessado que, acompanhado de seus periféricos, consegue fazer a medição de diversas grandezas elétricas. Ele substitui os medidores digitais e analógicos individuais de potência, corrente e tensão e apresenta outras informações que serão especificadas no decorrer do texto.

3.1 BREVE APRESENTAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Fazendo uso da rede elétrica trifásica, a alimentação geral é feita com a tensão de 380V. Dela ainda deriva, por meio de um transformador com relação de transformação 380V/220V, a alimentação auxiliar de 220V e a alimentação auxiliar em corrente contínua de $24V_{cc}$. Utilizando os 220V da alimentação auxiliar, a alimentação de $24V_{cc}$ é proveniente de uma fonte de alimentação chaveada, que possui como tensão de entrada 90-250V_{ca}.

O barramento de força de 380V é ramificado após o disjuntor e o DR para alimentar as diferentes máquinas elétricas, como visto no diagrama unifilar mostrado no anexo B. Por não ser parte do escopo deste trabalho, nem todos os disjuntores e elementos de comando serão citados, somente os relevantes para o estudo.

Para o controle do motor de indução com rotor de gaiola de esquilo de 7,5 cv, é utilizado um inversor de frequências, possibilitando assim, controlar a sua velocidade e o seu torque. O modelo utilizado possui ajustes automáticos às variações de carga e rede. Associado ao inversor de frequência, está o banco resistor de frenagem. Ele é usado durante a desaceleração de um motor para dissipar a energia cinética do sistema em forma de energia térmica, evitando a sobrecarga nos componentes de potência do inversor. O motor com rotor de gaiola de esquilo, no diagrama chamado motor gaiola, ainda apresenta um motor auxiliar com potência

de 0,37 kW. Esse motor é responsável por fazer a ventilação para baixas rotações, visto que o efeito da ventilação diminui conforme a rotação abaixa, podendo ocasionar um aumento excessivo na temperatura capaz de exceder os limites da classe térmica do sistema isolante.

Figura 3 – Interface do Inversor de Frequência



Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 4 – Motor Trifásico de Indução (Rotor Bobinado)



Fonte: LABMAQ, 2018

Acoplado ao eixo do motor de indução está uma máquina síncrona funcionando como gerador. Com a função de produzir um campo magnético constante, o campo do gerador é alimentado pela alimentação auxiliar de $220V_{cc}$. A máquina síncrona gerador, de potência 5kW, é conectada ao multimedidor para que sejam feitas as medições relevantes e é conectada a uma carga para que seja observada a transformação da energia mecânica em energia elétrica e o comportamento com diferentes cargas.

Figura 5 – Máquina Síncrona-Gerador



Fonte: LABMAQ, 2018

O *varivolt*, também chamado de regulador de tensão, é um dispositivo capaz de fornecer um valor de tensão alternada ajustável na

saída, a partir de uma tensão de entrada fixa, e é utilizado para controlar a tensão de partida do motor trifásico de indução com rotor bobinado, no diagrama do anexo B denominado motor trifásico de indução rotor de anéis. Ao motor também é conectado um multimetror para que sejam efetuadas as medições pertinentes e o reostato. O reostato, dispositivo capaz de variar a sua resistência, é acoplado ao motor com a função de reduzir a corrente de partida do circuito, aumentando o conjugado de partida.

Figura 6 – Bancada Didática



Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 7 - Varivolt



Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 8 - Reostato



Fonte: LABMAQ, 2018

3.2 MULTIMEDIDOR

O multimetido de grandezas elétricas utilizado na bancada é alimentado pela tensão auxiliar de $220V_{ca}$, possui memória para armazenar dados e ainda consegue transferi-los por meio de uma porta de comunicação serial, neste projeto, utilizando a interface RS485. Ele disponibiliza, no seu mostrador digital, as leituras medidas e calculadas realizadas a partir de três canais de entrada de corrente e tensão que podem ser feitas a três ou quatro fios (ligação delta ou estrela). Segundo o manual do multimetido MMW01-M, as grandezas elétricas medidas e calculadas são:

- Frequência da fase 1;
- Tensão por fase e média trifásica;
- Tensões máximas e mínimas;
- Correntes por fase e média trifásica;
- Correntes máximas e mínimas;
- Corrente de neutro;
- Fator de potência por fase e médio trifásico;
- Fatores de potência máximos e mínimos;

- Potência ativa, reativa e aparente instantânea por fase e média trifásica;
- THD e harmônicas ímpares até 31º ordem para tensão e corrente;
- Energia direta ativa, indutiva e capacitiva;
- Energia reversa ativa, indutiva e capacitiva;
- Consumo ativo e reativo trifásico;
- Demanda ativa e reativa trifásica;

Figura 9 - Multimetro MMW01-M

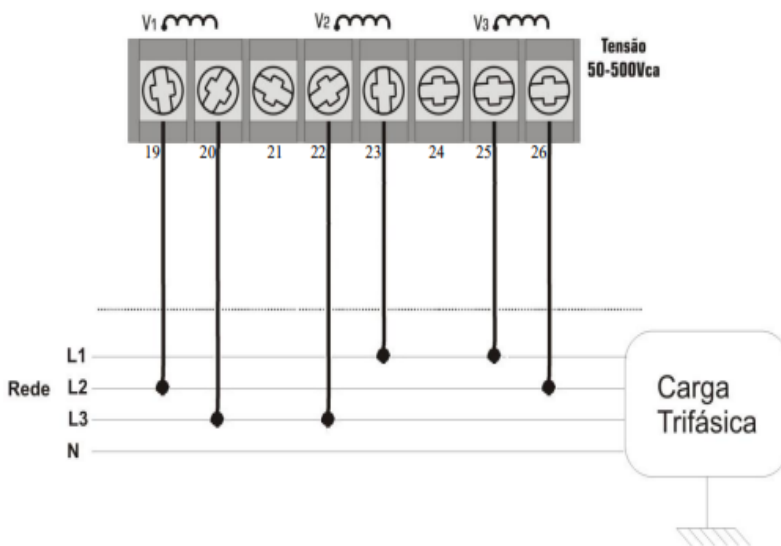


Fonte: Manual MMW01-WEG

Na bancada são utilizados dois multimetros, com as medidas sendo feitas com ligação delta. Em razão de possuírem o circuito de medição analógico, é possível, a partir do esquemático de um dos multimetros, compreender o seu funcionamento.

Para a medição de tensão, o MMW01-M possui precisão de 0,5 % com alta impedância de entrada, reduzindo a corrente drenada pelo instrumento. Tem como limite de tensão de entrada $500 V_{ca}$ e como as tensões a serem medidas no circuito não excedem este limite, não é necessária a utilização de TP – transformador de potencial. Assim, a medição é feita de maneira direta. Dos oito bornes disponíveis, seis são utilizados para serem feitas as ligações, de modo que cada par corresponda a um sensor. O manual fornece o esquema de montagem para a ligação delta sem TP mostrado na figura 10.

Figura 10 - Sensor de Tensão DELTA sem TP

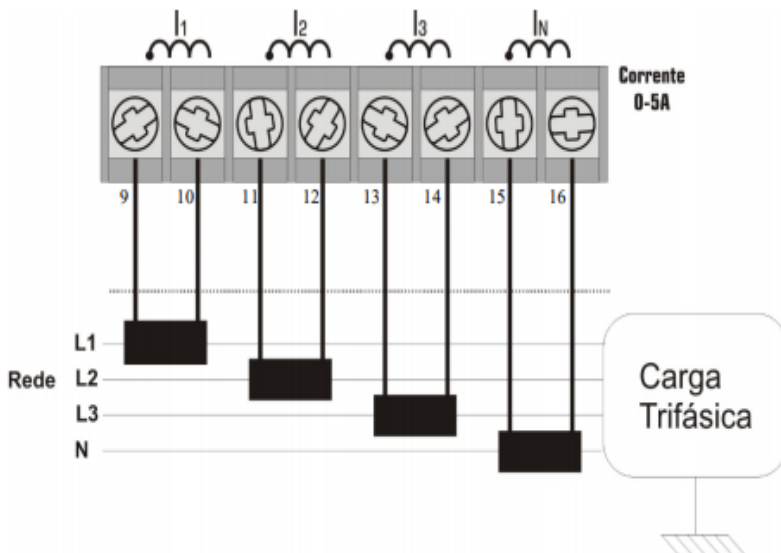


Fonte: Manual MMW01-WEG

Fazendo uma comparação com o diagrama elétrico de medição mostrado no anexo C, é possível observar que não são utilizados os TPs, sendo feitas as medições diretamente da alimentação e que o projeto apresenta um erro conceitual. Para o sensor V1, os bornes 19 e 20 são alimentados pelas fases L2 e L3 respectivamente. Em comparação ao diagrama elétrico, o borne 19 é alimentado pela fase C, que seria o equivalente à fase L3 do manual, e o borne 20 é alimentado pela fase B, que seria o equivalente à fase L2 do manual, somente com a diferença de convenção da nomenclatura. A inversão na entrada impossibilita a medição correta. Isso foi comprovado ao ser constatado que, logo após a instalação da bancada, a mesma apresentava resultados com valores diferentes do esperado. Após a análise, foi corrigida a instalação.

Para a medição de corrente a precisão especificada é de 0,5% e o limite de corrente é de 5 amperes. Como o circuito apresenta correntes com valores superiores ao limite, são utilizados TCs – transformadores de corrente, para que seja possível realizar as medições. De acordo com o manual, a ligação deve ser feita conforme a figura 11.

Figura 11 - Ligação a 3 TCs



Fonte: Manual MMW01-WEG

Sendo a ligação da corrente de neutro opcional, ao comparar com o diagrama elétrico de medição é possível observar que o mesmo está de acordo com o manual, tanto a ordem das fases quanto a polaridade dos TCs. Como exemplo tem-se o sensor I1, que mede a corrente do TC1, onde o borne 9 é alimentado pelo S1 e o borne 10 é alimentado pelo S2.

Os TCs empregues no sistema de medição são do modelo KR 127 da Kron e possuem como corrente de entrada 50 A e corrente de saída 5 A, ou seja, relação de transformação 50/5 A. A classe de exatidão do KR 127 é 1,2, indicando que 1,2 % é o limite de erro garantido pelo fabricante do instrumento, que se pode cometer em qualquer medida de corrente efetuada pelo TC.

4 ENSAIOS EM MÁQUINAS ROTATIVAS ELÉTRICAS

As máquinas elétricas rotativas são equipamentos capazes de transformar a energia elétrica em energia mecânica e capazes de fazer o caminho inverso também. Utilizadas como geradores, as máquinas têm papel fundamental na geração de energia elétrica de fontes hidráulicas, eólicas entre outras. Usadas como motores, possuem ampla aplicação em diversos processos industriais e estão presentes no dia-a-dia em inúmeros eletrodomésticos, como ventiladores, processadores de alimentos e outros.

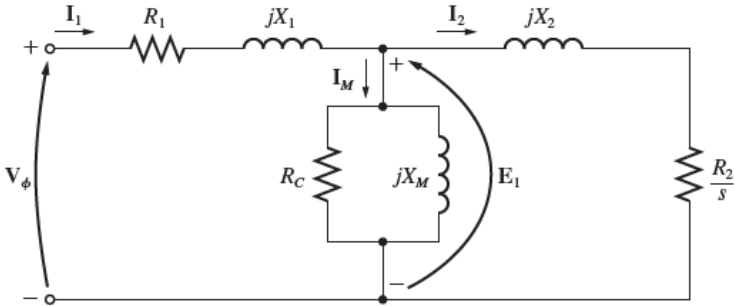
Compreender seu funcionamento, assim como determinar seus parâmetros e outras características, é de suma importância para os acadêmicos de engenharia elétrica. Para isso, são realizados ensaios com as máquinas elétricas rotativas, afim de que seja possível analisá-las. Os ensaios tradicionais feitos em máquinas síncronas e motores de indução serão apresentados.

4.1 MOTOR DE INDUÇÃO

4.1.1 Ensaio de rotor travado (ou bloqueado)

Para a determinação de parte dos parâmetros do motor de indução é utilizado o ensaio de rotor travado é utilizado. Nesse ensaio, o rotor é bloqueado ou travado de modo que não possa se mover, uma tensão é aplicada ao motor e a tensão, corrente e potência resultantes são medidas (CHAPMAN, 2013). Com o travamento do rotor de modo que ele não possa girar, o escorregamento “s” tende a 1 (um) e perdas por atrito e ventilação não existem.

Figura 12 - Circuito Elétrico Equivalente por Fase de um Motor de Indução



Fonte: CHAPMAN, 2013

Analisando o circuito elétrico equivalente mostrado na figura 12 é possível observar que, como o escorregamento possui valor unitário, $R_2/s = R_2$. Sendo a reatância de magnetização X_m muito maior em comparação com R_2 e X_2 , quase não circulará corrente no ramo magnetizante, sendo as perdas muito pequenas. Assim, o circuito pode ser simplificado de modo a ser uma associação em série de R_1 , X_1 , X_2 e R_2 . Por ocorrer variações nos valores das resistências e indutâncias devido à frequência, o ensaio deve ser realizado em frequência próximas a de operação da máquina. A saturação afeta de forma significativa as reatâncias de dispersão, sendo importante ensaiar com a corrente próxima do seu valor nominal. A impedância de rotor bloqueado também pode ser afetada pela posição do rotor, embora geralmente esse efeito seja pequeno em rotores de gaiola (FITZGERALD, 2006).

Para realizar o ensaio, deve-se bloquear o rotor de maneira que o mesmo não gire e colocar o reostato de partida na posição de curto-circuito. Com o *varivolt*, a tensão deve ser aplicada de modo que a corrente seja a nominal do motor. Registrar os dados da tensão V_{rt} , corrente I_{rt} e potência P_{rt} .

A partir dos dados, é possível encontrar os valores de:

$$R_{rt} = \frac{P_{rt}}{I_{rt}^2} \quad (4.1)$$

$$Z_{rt} = \frac{V_{rt}}{I_{rt}} \quad (4.2)$$

$$X_{rt} = \sqrt{Z_{rt}^2 - R_{rt}^2} \quad (4.3)$$

Sabendo que $X_1 + X_2 = X_{rt}$, é possível com a tabela 3, de distribuição, separar os valores de X_1 e X_2 .

Tabela 3 - Tabela de Distribuição Empírica de Reatâncias de Dispersão em Motores de Indução

Classe de motor	Descrição	Fração de $X_1 + X_2$	
		X_1	X_2
A	Conjugado de partida normal, corrente de partida normal	0,5	0,5
B	Conjugado de partida normal, corrente de partida baixa	0,4	0,6
C	Conjugado de partida elevado, corrente de partida baixa	0,3	0,7
D	Conjugado de partida elevado, escorregamento elevado	0,5	0,5
Rotor bobinado	Desempenho varia segundo a resistência do rotor	0,5	0,5

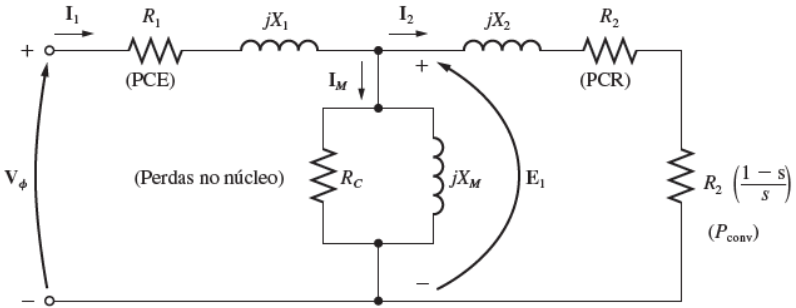
Fonte: Norma IEEE 112

Os valores de R_1 e R_2 podem ser encontrados de maneira aproximada usando o fato de que $R_{rt} = R_1 + R_2$, de maneira análoga à X_{rt} . Também é possível encontrar o valor de resistência fazendo o ensaio CC para resistência do estator, mas que também não é exato, pois ignora efeitos peculiares dos enrolamentos quando aplicados uma tensão CA.

4.1.2 Ensaio a Vazio

O ensaio a vazio (ou sem carga) de um motor de indução mede as perdas rotacionais do motor e fornece informação sobre sua corrente de magnetização (CHAPMAN, 2013). Como seu nome indica, ele consiste em ensaiar o motor com o rotor livre de qualquer tipo de carga. Assim, a potência que o motor consome está suprimindo as perdas do motor, que são as perdas do cobre no estator P_{CDE} , as perdas no núcleo P_{nucleo} e as perdas rotacionais P_{rot} , que são as perdas por atrito, ventilação e suplementares. Para que seja mais fácil a compreensão, é conveniente observar o circuito equivalente monofásico do motor de indução já com as perdas do rotor e as perdas do núcleo separadas.

Figura 13 - Circuito Elétrico Equivalente por Fase, com as Perdas do Rotor e as Perdas do Núcleo Separadas



Fonte: CHAPMAN, 2013

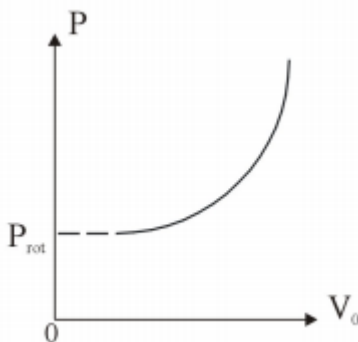
Na figura 13 R_1 é a resistência do Estator, X_1 a reatância de dispersão, X_m a reatância de magnetização, R_c perda no núcleo do estator por fase, X_2 é a reatância referida ao lado do estator, R_2 é a resistência referida ao lado do estator e $R_2(1-s)/s$ é a potência convertida.

Como o escorregamento s tende a 0 (zero), o valor de $R_2(1-s)/s$ tende a ser muito maior que os valores de R_2 e X_2 , e a corrente I_2 tende a ser muito pequena, pois $R_2(1-s)/s$ impede sua passagem. Assim, R_2 e X_2 podem ser desprezados. Com isso, o circuito equivalente simplificado apresenta R_1 em série com X_1 e em série com o paralelo de X_m e R_c .

Para realizar o ensaio, deve-se ligar o motor com o reostato de partida em sua resistência máxima, e fazendo uso do *varivolt*, aplicar a tensão nominal no motor ou até 125% da tensão nominal. Após atingir a velocidade nominal, o reostato de partida deve ser curto-circuitado. Os valores por fase da tensão V_x , corrente I_x e potência P_x devem ser registrados. Para fazer a separação de perdas, deve-se decrementar a tensão sucessivamente, observando o valor da corrente e fazendo os registros das tensões e potências até o instante em que a corrente aumenta com a diminuição da tensão.

Com os valores registrados, faz-se então um gráfico com a potência x tensão. As perdas rotacionais R_{rot} serão o ponto em que a curva tocar o eixo da potência. Para que isso ocorra, a curva deve ser extrapolada, ficando similar ao exemplo mostrado na figura 14.

Figura 14 - Curva de Perdas Rotacionais



Fonte: LABMAQ

A partir do circuito elétrico equivalente tem-se que as perdas no cobre do estator $P_{PCE} = 3I^2R_1$ e, com o teste de separação das perdas, é possível encontrar o valor de P_{rot} . P_{rot} sob carga são consideradas constantes e iguais ao seu valor a vazio, quando em tensão e frequência nominais. Como a $P_{entrada} = P_{PCE} + P_{nucleo} + P_{rot}$ e a $P_{entrada}$ já foi medida pelo multimetido, é possível, então, descobrir a P_{nucleo} .

Fazendo a lei das malhas para o circuito, temos que

$$V_1 \angle 0^\circ - \dot{E}_1 - (R_1 + jX_1) \cdot I_1 \angle -\varphi = 0 \quad (4.4)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{P}{V_1 I_1} \right) \quad (4.5)$$

A corrente que passa pela parte resistiva do núcleo é $I_f = \frac{P_{nucleo}}{E_1}$. I_f tem o mesmo ângulo que E_1 , por ser uma impedância puramente resistiva. Assim

$$R_c = \frac{E_1}{I_f} \quad (4.6)$$

Como a corrente que passa por X_m é igual à corrente total do ramo magnetizante $I_1 = I_m$, menos a corrente I_f , tem-se que $I_m = I_1 - I_f$, portanto:

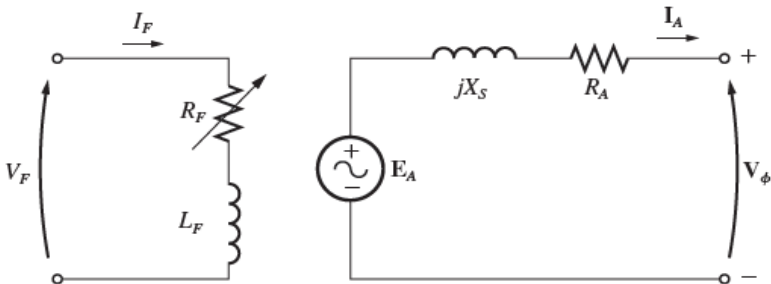
$$X_m = \frac{E_1}{I_m} \quad (4.7)$$

4.2 MÁQUINA SÍNCRONA – GERADOR

4.2.1 Ensaio a vazio (ou sem carga)

O ensaio a vazio da máquina síncrona é feito com ela sendo acionada por outro motor e com os seus terminais de armadura em aberto, de modo que a tensão gerada interna E_A seja a mesma que a de saída V_ϕ . Isso é melhor visualizado observando o seu circuito elétrico equivalente mostrado na figura 15. Com a análise do comportamento da tensão E_A em função da corrente de excitação de campo I_F é possível plotar os valores de modo a construir uma curva. Essa curva é denominada característica a vazio (CAV) (ou característica de circuito aberto - CCA) de um gerador (CHAPMAN,2013). A potência que supre a máquina sem excitação corresponde às perdas por atrito e ventilação. Ao excitar a máquina, a potência então, é a soma das perdas por atrito e ventilação, mais as perdas no ferro.

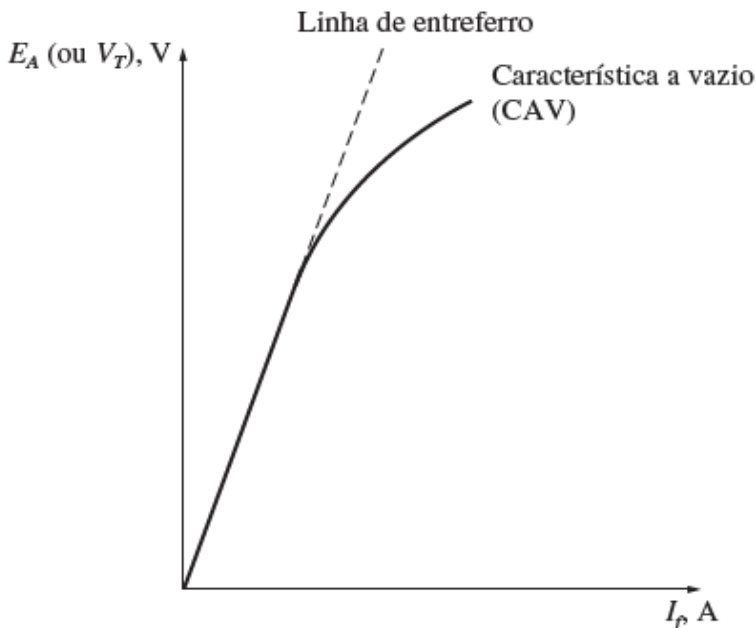
Figura 15 – Circuito Elétrico Equivalente da Máquina Síncrona



Fonte: CHAPMAN, 2013

Com a corrente de excitação de campo em 0 (zero), a velocidade do gerador é elevada até seu valor síncrono nominal, a partir de outro motor. A corrente de campo é, então, colocada em seu valor máximo e gradualmente diminuída, sendo registrados os valores tanto de corrente de excitação do campo, quanto da tensão de circuito aberto E_A . As medidas se iniciam pelo valor máximo da corrente de campo para evidenciar a tensão devido ao magnetismo residual, observada quando a corrente de campo volta a ser nula.

Figura 7 - A característica a vazio (CAV) de um gerador síncrono



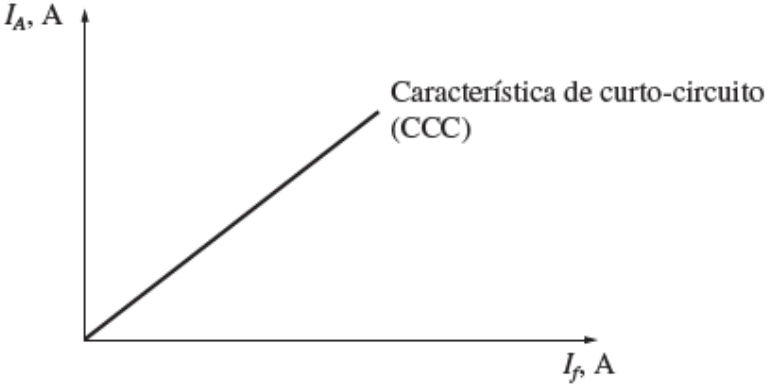
Fonte: CHAPMAN

Conforme a saturação vai diminuindo, a curva vai perdendo a sua curvatura e se tornando linear. Quando o ferro está saturado, a sua relutância aumenta dramaticamente e, nessa região, o fluxo aumenta muito mais vagarosamente com o aumento da força magnetomotriz. A porção linear de uma CAV é denominada *linha de entreferro* da característica (CHAPMAN, 2013).

4.2.2 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito é realizado com os três terminais de enrolamento de armadura curto-circuitados. Com a máquina acionada na velocidade síncrona, a corrente de campo pode ser variada e um gráfico da corrente de armadura versus corrente de campo pode ser obtido. Essa relação é conhecida como característica de curto-circuito (FITZGERALD, 2006). Sendo I_A a corrente de armadura e I_f a corrente de campo, a característica de curto-circuito (CCC) é semelhante ao gráfico mostrado na figura 17.

Figura 17 - Característica de Curto-Circuito



Fonte: CHAPMAN, 2013

O ensaio deve ser realizado com a corrente de armadura I_A iniciando em seu valor nominal (ou até duas vezes esse valor) e tomando as medidas simultaneamente de corrente de armadura I_A e corrente de excitação de campo I_f . Inicia-se as medidas pelo maior valor da corrente de armadura para se controlar o aquecimento da armadura durante os testes. No caso da máquina fria optou-se pela leitura inversa, ou seja, da menor corrente para a maior, justamente para minimizar o aquecimento.

A reatância síncrona não saturada (correspondendo a condições não saturadas de operação da máquina) pode ser encontrada a partir das características a vazio (CAV) e de curto-circuito (CCC) (FITZGERALD,2006). Analisando o circuito elétrico equivalente, considerando os terminais curto-circuitados e levando em consideração que $X_s \gg R_A$, tem-se que:

$$X_s \approx \frac{E_A}{I_A} \quad (4.8)$$

Assim, a partir de um valor de corrente de excitação de campo, são obtidos um valor de tensão gerada interna E_A por meio da CAV (lida a partir da linha do entreferro pois considera-se não saturada) e uma corrente de curto-circuito $I_{A,CC}$ por meio da CCC e são aplicados em (4.8). Para encontrar a reatância saturada, a resolução é análoga, somente com a diferença de utilizar dados da CAV onde são visíveis os efeitos da saturação.

5 ENSAIOS PRÁTICOS E VALIDAÇÃO

Seguindo os procedimentos apresentados anteriormente, foram realizados os ensaios práticos no motor de indução trifásico e na máquina síncrona gerador do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC. Os dados coletados foram tabelados e serão apresentados com as suas devidas considerações.

5.1 ENSAIO MÁQUINA SÍNCRONA

Para a obtenção dos parâmetros da máquina síncrona, foram realizados três ensaios. A partir deles foram calculadas as médias dos valores encontrados. Os ensaios devem ser realizados com a máquina aquecida, porém, por conta do pouco tempo para a sua realização durante as aulas, os ensaios são realizados sem o devido aquecimento. Aqui serão apresentados os resultados tanto com a máquina aquecida, quanto com a máquina sem aquecimento, para que sejam comparados os resultados.

5.1.1 Ensaio a vazio (ou sem carga)

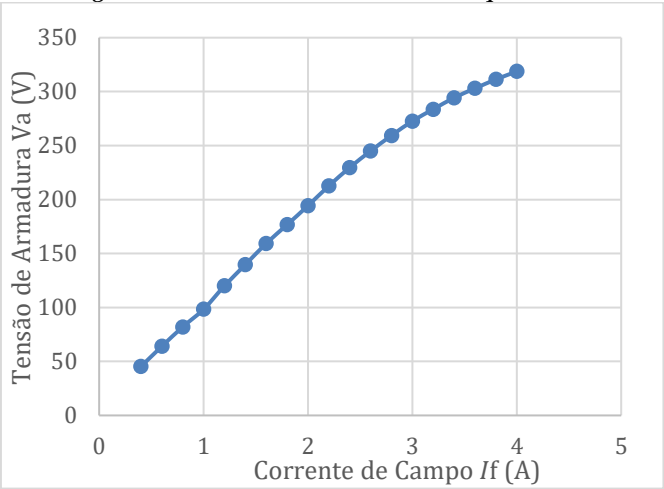
Para encontrar a característica a vazio, foram tomados os valores da corrente de campo e da tensão de armadura com a máquina com os terminais em aberto. Os valores obtidos para o ensaio com a máquina fria estão exibidos na tabela 4. A partir deles foi feita a média dos valores e traçado o gráfico da curva de magnetização mostrado na figura 18.

Tabela 4 - Ensaio a Vazio – Máquina Fria

	1º	2º	3º
If(A)	Va(V)	Va(V)	Va(V)
4	319,2	318	319
3,8	312	311,4	311,2
3,6	303	303,5	303,3
3,4	295	294	294
3,2	283,7	283	285
3	273	272	273
2,8	258	260	260,2
2,6	245	245,3	245
2,4	229	230	230
2,2	212	213	213
2	193,4	195	195,4
1,8	176,4	177,7	177
1,6	160	159,2	159
1,4	140	139	140
1,2	117,3	123,2	120
1	95	100,3	100
0,8	83,3	83,2	80
0,6	63	65	64
0,4	45	46	45
0,2	fora	fora	Fora
0	fora	fora	Fora

Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 18 - Característica a Vazio - Máquina Fria



Fonte: AUTOR

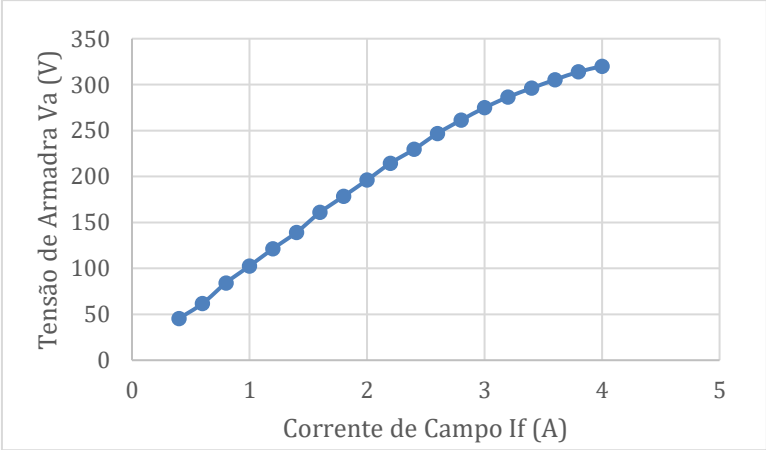
Os resultados obtidos com o ensaio a vazio, com uma hora de aquecimento da máquina, estão apresentados na tabela 5 e o seu gráfico na figura 19.

Tabela 5- Ensaio a Vazio – Máquina Aquecida

	1ª	2ª	3ª
If(A)	Va	Va	Va
4	320	320,1	320,1
3,8	314	314	313,8
3,6	305	305	306,2
3,4	296,8	295,2	296,3
3,2	285,6	287,5	286,4
3	274	275	275,6
2,8	262	261	261
2,6	247	247	246,8
2,4	230	230	228,8
2,2	215	214,7	213,9
2	196,2	195,7	196,4
1,8	179	177,3	179
1,6	160	161,5	161,2
1,4	138	140	139,6
1,2	122,3	120	121,9
1	102	101,3	104,4
0,8	84,24	84,3	84
0,6	62	61	62
0,4	46	45	45,5
0,2	fora	fora	fora
0	fora	fora	fora

Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 19 - Característica a Vazio - Máquina Aquecida



Fonte: AUTOR

É possível observar que os valores de tensão para correntes abaixo de 0,4 A não foram encontrados e, portanto, ficaram ausentes no gráfico. Também é possível observar que, com o aumento da corrente de campo, a curva começa a perder a linearidade. Isso ocorre como já explicado no capítulo anterior, por conta da saturação dos materiais ferromagnéticos.

O desvio-padrão máximo encontrado no ensaio a vazio com a máquina síncrona fria foi de 2,977135 V e, com a máquina síncrona aquecida, foi de 1,62583312 V.

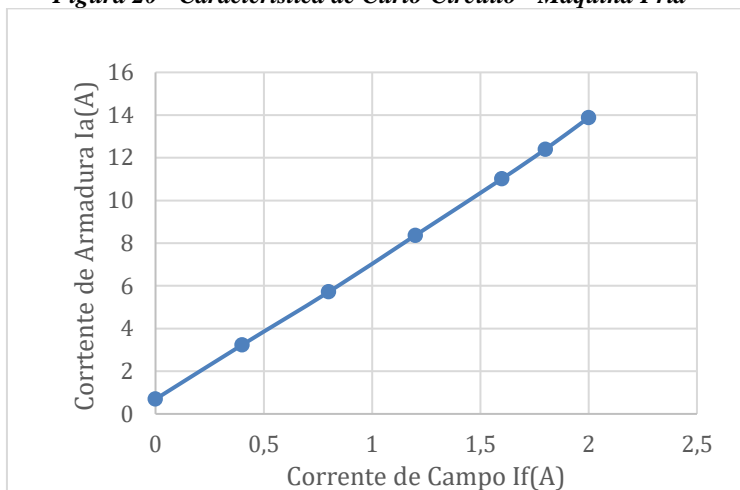
5.1.2 Ensaio de curto-circuito

Para encontrar a característica de curto-circuito, foram tomados os valores da corrente de campo e corrente de armadura. Os valores obtidos para o ensaio com a máquina fria são apresentados na tabela 6. Após calcular a média dos valores obtidos, a curva gerada é ilustrada na figura 20.

Tabela 6 - Ensaio de Curto – Circuito – Máquina Fria

	1º	2º	3º
I_f(A)	I_a	I_a	I_a
0	0,72	0,68	0,68
0,4	3,3	3,3	3,1
0,8	5,75	5,7	5,7
1,2	8,4	8,35	8,35
1,6	11	11,05	11
1,8	12,4	12,4	12,4
2	13,9	13,94	13,8

Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 20 - Característica de Curto-Circuito - Máquina Fria

Fonte: AUTOR

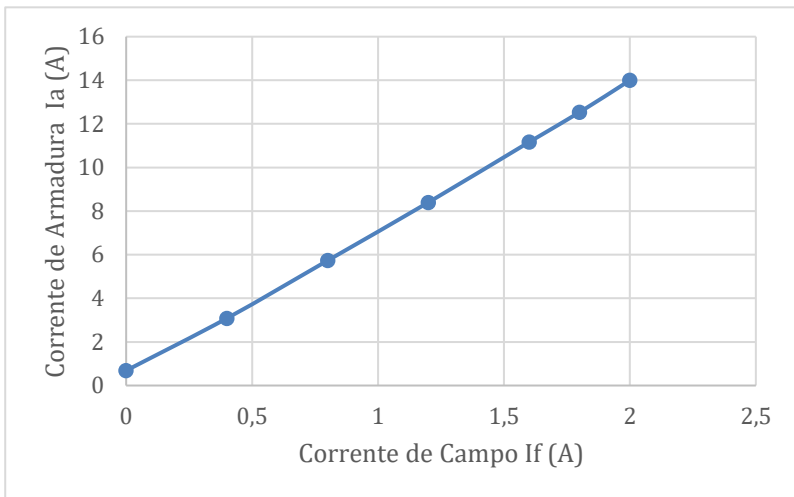
Os valores medidos com a máquina sendo aquecida por uma hora são mostrados na tabela 7 e a curva correspondente aos valores encontrados é mostrada na figura 21.

Tabela 7 - Ensaio de Curto-Circuito – Máquina Aquecida

	1º	2º	3º
I_f (A)	I_a	I_a	I_a
0	0,72	0,67	0,67
0,4	3,1	3	3,15
0,8	5,7	5,8	5,7
1,2	8,4	8,45	8,35
1,6	11,2	11,1	11,2
1,8	12,5	12,6	12,5
2	14	14	14

Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 21 - Característica de curto-circuito - Máquina aquecida

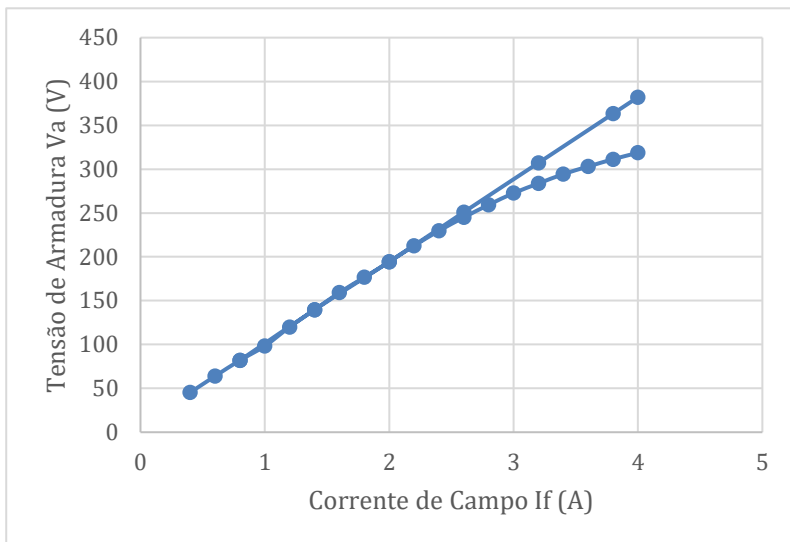


Fonte: AUTOR

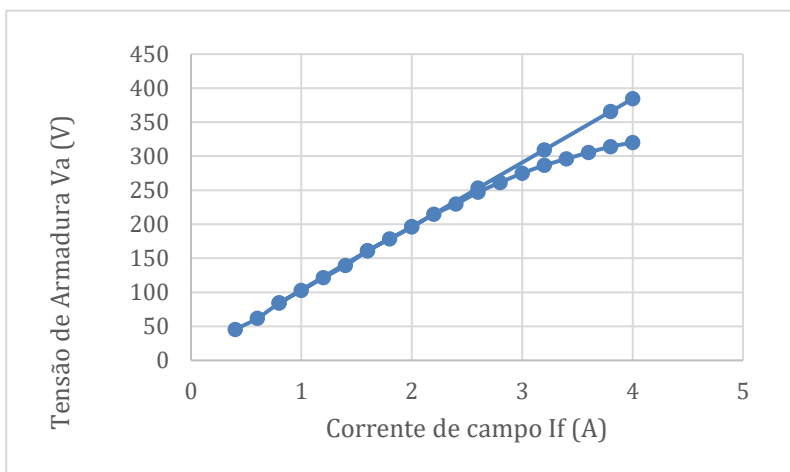
Como era de se esperar, as curvas apresentaram uma característica retilínea (linear). O desvio-padrão máximo encontrado na corrente no ensaio de curto-circuito com a máquina fria foi de 0,115470054 A e na máquina aquecida foi de 0,076376 A.

5.1.3 Linha do entreferro

Com dois pontos das curvas de magnetização das figuras 18 e 19, foram encontradas as equações lineares para que seja plotada a linha de entreferro. A equação encontrada para a linha de entreferro da máquina fria obedece a relação $y = 93,611x + 7,6111$ e está representada na figura 22, para a linha de entreferro da máquina aquecida, a equação obedece a relação $y = 93,643x + 9,7171$ e está representada na figura 23.

Figura 22 - Linha de entreferro- Máquina Fria

Fonte: AUTOR

Figura 23 - Linha de entreferro - Máquina Aquecida

Fonte: AUTOR

Como exemplo, considerando-se uma corrente de campo com o valor de 1,8 A tomando-se os valores respectivos de tensão de armadura que pertençam a linha de entreferro da característica a vazio e a corrente de armadura da característica de curto-circuito, obtêm-se as tabelas 8 e 9, respectivamente, para a máquina fria e aquecida.

Tabela 8 - Valores com Máquina Fria

If(A)	Va (V)	Ia (A)
1,8	101,6777	12,4

Fonte: AUTOR

Tabela 9 - Valores com Máquina Aquecida

If(A)	Va (V)	Ia (A)
1,8	102,9268	12,533

Fonte: AUTOR

Por conta do multimetido medir a tensão de linha e os cálculos se valerem de um circuito monofásico equivalente, os valores de tensão de armadura das tabelas anteriores são os valores medidos realmente divididos por raiz de três (tensão de fase).

5.2 ENSAIO DO MOTOR TRIFÁSICO DE INDUÇÃO

Para coletar os dados, foram realizados três ensaios e a partir deles foram feitas as médias das grandezas. Os ensaios foram realizados com o aquecimento do motor e sem o aquecimento do motor, por ser realizado dessa maneira durante as aulas práticas.

5.2.1 Ensaio de rotor travado (bloqueado)

Para o ensaio de rotor travado, o rotor foi impedido de girar e com o *varivolt* foi aumentada a tensão até o valor em que a corrente do motor atingisse o seu valor nominal. Então, foi feita a medição da tensão, corrente e da potência. As tabelas 10 e 11 apresentam os resultados, onde todos os ensaios foram feitos com a mesma posição do eixo. Na primeira

tabela os dados são referentes ao motor sem aquecimento e na segunda, com aquecimento de uma hora (sem ventilação).

Tabela 10- Ensaio Rotor Travado - Máquina Fria

VI(V)	II(A)	P3f(W)
53,02	10,7	551
50	10,65	537
51,27	10,77	553

Fonte: LABMAQ, junho de 2018

Tabela 11 - Ensaio Rotor Travado - Máquina Aquecida

VI(V)	II(A)	P3f(W)
50,16	10,72	550
49,6	10,63	540
49,6	10,62	539

Fonte: LABMAQ, junho de 2018

Como os dados são referentes à tensão de linha e potência trifásica, é preciso trabalhar com os resultados para se obter as grandezas monofásicas. Após as manipulações matemáticas necessárias, foram encontrados, para o motor sem aquecimento, os valores:

Tabela 12 - Valores Médios - Máquina Fria

Monofásico		
Vrt (V)	Irt (A)	Prt (W)
29,69312	10,70667	182,3333

Fonte: AUTOR

Os resultados apresentam desvio-padrão de 0,875462 V para tensão, 0,060277 A para a corrente e 2,905933 W para a potência.

Para o motor com aquecimento de uma hora (sem ventilação), os resultados obtidos estão na tabela 13.

Tabela 13 - Valores Médios - Máquina Aquecida

Monofásico		
V_{rt} (V)	I_{rt} (A)	P_{rt} (W)
28,74435	10,65667	181

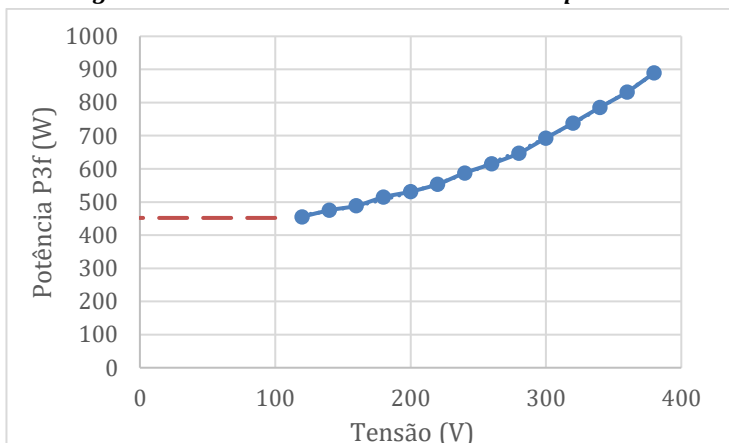
Fonte: AUTOR

Esses resultados foram obtidos com eixo do motor imóvel tanto durante o ensaio quanto durante o tempo entre os ensaios. O desvio-padrão para a tensão foi de 0,186667 V, para a corrente foi de 0,055076 A e para a potência foi no valor de 2,027588 W.

5.2.2 Ensaio a Vazio (ou sem carga)

Com o rotor sem qualquer tipo de carga e baixando o valor da tensão de seu valor nominal a passos de 20 V, foram anotados os valores de corrente e potência trifásica até o ponto no qual a corrente modifica o seu comportamento de diminuir e para a aumentar. Os resultados obtidos estão na tabela 14. Optou-se por medir a potência em dois pontos, um de máximo e um de mínimo, devido às instabilidades na execução das medidas de potência.

Com os valores obtidos, foi traçada a curva de perdas rotacionais para a máquina sem aquecimento mostrada na figura 24.

Figura 24 - Curva de Perdas Rotacionais - Máquina Fria

Fonte: AUTOR

Tabela 14 – Ensaio a Vazio – Máquina Fria

1ª				2ª			3ª		
VI(V)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)
380	5,3	877	884	5,35	923	930	5,3	853	871
360	4,95	825	832	5	861	871	4,98	799	805
340	4,63	774	796	4,66	810	833	4,63	746	756
320	4,36	730	740	4,4	759	770	4,35	709	722
300	4,05	693	704	4	684	700	4,04	677	700
280	3,82	654	674	3,8	631	644	3,78	633	748
260	3,57	620	634	3,55	600	617	3,58	603	618
240	3,34	593	610	3,31	560	586	3,31	586	591
220	3,14	560	580	3,1	530	558	3,1	537	557
200	2,97	532	555	2,98	526	535	2,95	509	531
180	2,85	510	539	2,82	495	514	2,75	500	530
160	2,75	488	513	2,65	469	492	2,7	472	498
140	2,73	477	495	2,6	453	478	2,61	471	477
120	2,8	456	480	2,72	441	458	2,72	441	457

Fonte: LABMAQ, 2018

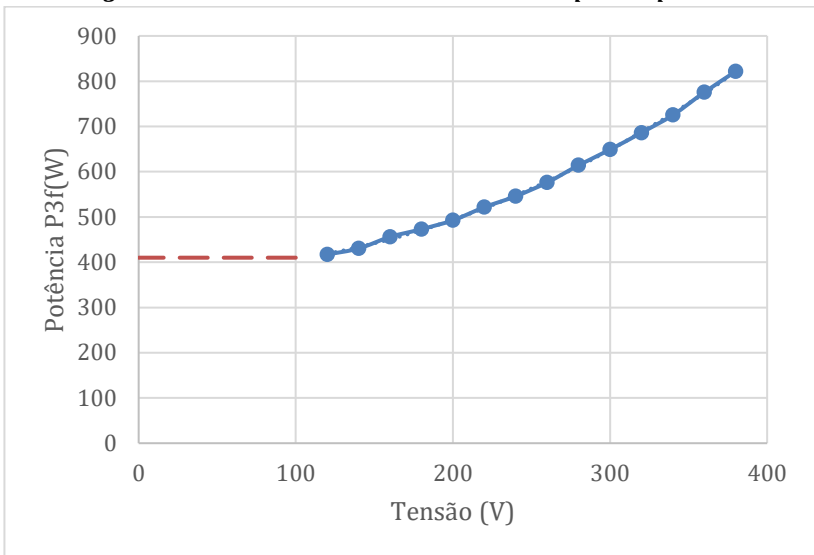
Tabela 15 - Ensaio a Vazio - Máquina Aquecida

1ª				2ª			3ª		
VI(V)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)	II(A)	P3f(W)	P3f(W)
380	5,2	825	832	5,18	814	830	5,16	810	819
360	4,82	769	783	4,8	772	788	4,84	767	774
340	4,52	723	740	4,5	718	721	4,5	719	730
320	4,2	682	705	4,2	673	688	4,2	675	694
300	3,96	635	668	3,96	640	657	3,98	632	661
280	3,72	593	641	3,7	602	626	3,7	597	626
260	3,47	570	600	3,45	564	586	3,46	557	580
240	3,2	540	580	3,2	532	548	3,2	526	549
220	3,02	499	541	3	517	541	3	505	526
200	2,83	479	516	2,9	479	507	2,8	475	500
180	2,7	442	510	2,7	454	483	2,69	458	491
160	2,6	470	470	2,6	437	467	2,53	437	454
140	2,4	414	461	2,58	416	443	2,48	416	432
120	2,5	391	440	2,58	410	443	2,52	397	421
100									

Fonte: LABMAQ, 2018

Com o auxílio da planilha Microsoft/EXCEL, foi encontrada a equação que corresponde à curva e, com a extrapolação feita, foi encontrado o valor de 450 W para as perdas rotacionais.

Para a máquina com aquecimento, com os dados contidos na tabela 15 e mostrada na figura 25, com a extrapolação, foi encontrando o valor de 410 W.

Figura 25 - Curva de Perdas Rotacionais - Máquina Aquecida

Fonte: AUTOR

5.3 INCERTEZAS

Para a estimação de incertezas foram escolhidos alguns parâmetros já medidos e os valores foram comparados com os obtidos por meio de um instrumento de alta exatidão.

5.3.1 Gerador síncrono

Para encontrar a reatância síncrona não saturada do gerador síncrono utilizando-se a equação 4.8, tem-se que a reatância síncrona não saturada corresponde a:

$$X_s \approx \frac{E_A}{I_A}$$

Para encontrar a incerteza, deve-se separá-la em derivadas parciais, assim. Aplicando o método para estimar a incerteza com grandezas de entrada não correlacionadas tem-se:

$$u_c^2 = \left(\frac{1}{I_A}\right)^2 * \sigma_E^2 + \left(\frac{-E_A}{I_A^2}\right)^2 * \sigma_I^2 \quad (5.1)$$

Utilizando os valores encontrados no ensaio e com o maior valor de desvio-padrão de cada grandeza, para que seja encontrada a incerteza no pior caso, para o gerador síncrono sem aquecimento, foi encontrada a reatância:

$$X_s = 8,1992 \pm 0,25 \, \Omega$$

Para o gerador com aquecimento de uma hora, a reatância vale:

$$X_s = 8,2124 \pm 0,14 \, \Omega$$

É possível observar que os valores encontrados, tanto para a máquina fria, quanto para a máquina aquecida, são próximos. Com a reatância da máquina sendo levemente menor e com uma faixa de incertezas maior.

5.3.2 Motor de indução trifásico

Para encontrar os parâmetros do motor de indução trifásico são utilizados (4.1), (4.2) e (4.3).

Para encontrar R_{rt} , fazendo as derivadas parciais da sua equação, a incerteza padrão combinada é:

$$u_c^2 = \left(\frac{1}{I_{rt}^2}\right)^2 * \sigma_P^2 + \left(\frac{-2P_{rt}}{I_A^3}\right)^2 * \sigma_I^2 \quad (5.2)$$

Para Z_{rt} :

$$u_c^2 = \left(\frac{1}{I_{rt}}\right)^2 * \sigma_V^2 + \left(\frac{-V_{rt}}{I_{rt}^2}\right)^2 * \sigma_I^2 \quad (5.3)$$

Assim, para o motor sem aquecimento, tem-se que:

$$R_{rt} = 1,591 \pm 0,031 \, \Omega \text{ e } Z_{rt} = 2,773 \pm 0,082 \, \Omega$$

Para o motor com aquecimento:

$$R_{rt} = 1,594 \pm 0,024 \, \Omega \text{ e } Z_{rt} = 2,697 \pm 0,018 \, \Omega$$

Utilizando (4.3) para obter X_{rt} , tem-se que:

$X_{rt} = 3,197 \pm 0,113 \, \Omega$ para máquina fria e $X_{rt} = 3,133 \pm 0,042 \, \Omega$, para a máquina aquecida.

Com a tabela 3, tabela de distribuição empírica de reatâncias de dispersão, é possível afirmar que, para o motor de indução trifásico com rotor bobinado, X_{rt} é dividida igualmente entre X_1 e X_2 .

5.3.3 Perdas

Para a medição de potência, por conta da alta variação nas medições a incerteza foi considerada o desvio-padrão das medições.

Os resultados obtidos para o motor frio e para o motor aquecido foram, respectivamente:

$$P_{rot} = 450 \pm 30 \, \text{W} \text{ e } P_{rot} = 410 \pm 25 \, \text{W}$$

5.4 VALIDAÇÃO

Como forma de comparar os resultados, foram realizados novos ensaios com a mesma metodologia, sem alteração no acoplamento, mas utilizando o instrumento de alta exatidão Yokogawa WT500, de modo a ter suas medidas como referencial e validar os resultados. As figuras 26 (gerador síncrono) e 27 (motor de indução) mostram a execução do ensaio de validação.

Figura 26 - Ensaio de Validação – Gerador Síncrono



Fonte: LABMAQ, 2018

Figura 27 - Ensaio de Validação – Motor de Indução



Fonte: LABMAQ, 2018

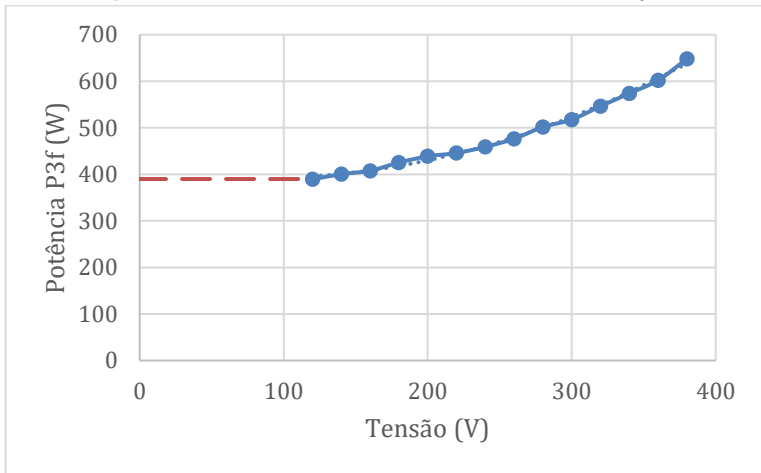
A partir do ensaio de validação da máquina síncrona aquecida, foi obtida a reatância síncrona:

$$X_s = 9,28 \, \Omega$$

O valor é de mesma ordem de grandeza que os valores encontrados pelo multimedidor da bancada didática, porém, mesmo com a faixa de incerteza, o valor encontrado pelo WT500 não está contido na faixa a qual ela abrange.

A curva de perdas rotacionais encontrada no ensaio de validação pode ser vista na figura 28.

Figura 28 - Curva de Perdas Rotacionais - Validação



Fonte: AUTOR

O resultado, após a extrapolação da curva, foi de $P_{rot} = 390 \, \text{W}$, o que significa que o valor medido pelo multimedidor da bancada didática é condizente, já que $P_{rot} = 410 \pm 25 \, \text{W}$ para o multimedidor.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo analisar a confiabilidade dos resultados obtidos pelo sistema de medição da bancada didática do Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos do EEL/UFSC, onde diferentes tipos de máquinas elétricas rotativas são ensaiadas.

Com a realização dos ensaios tradicionais no motor de indução trifásico com rotor bobinado e no gerador síncrono, foi possível, após a comparação com instrumento de medição com alta exatidão, analisar as suas discrepâncias.

A bancada, por meio do medidor, apresentou alguns valores divergentes, porém da mesma ordem de grandeza dos valores para validação. No ensaio para a obtenção de perdas rotacionais, a faixa de incerteza foi relativamente grande, mas o valor encontrado estava correto.

Também foi possível concluir que os ensaios sem aquecimento apresentam valores muito próximos dos valores obtidos nos ensaios com aquecimento. A incerteza é maior, mas não a ponto de inviabilizar a prática didática.

Pode-se perceber que a bancada apresenta um sistema de medição compatível com o ensino, onde as medições apresentam valores próximos do real, porém, não podendo ser utilizada em situações onde são necessários resultados com uma maior fidelidade.

Como sugestão para trabalhos futuros, realizar os ensaios CC para a obtenção das resistências do estator e rotor e comparar com os valores obtidos por meio das aproximações citadas neste trabalho. Realizar a análise de incerteza para o instrumento de alta exatidão Yokogawa WT500.

REFERÊNCIAS

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh, 2013. 684 p.

RIBEIRO, Marco Antonio. **Metrologia Industrial – Fundamentos da confirmação metrológica**. 5. ed. Salvador : [s. n], 1999. 241 p.

ALBERTAZZI, G. Jr. & A. R. de Sousa, **Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial**, 1a edição, 2008.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr. C. E UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com Introdução à Eletrônica De Potência**. 6ª Edição, Bookman, 2006.

SILVA, R.; MONTEIROA, E. C.; VASCONCELOS, H. S, R. **Reflexões sobre a educação técnica em metrologia para atender a demandas do setor produtivo: mão-de-obra qualificada de suporte à engenharia**. Revista de Ensino de Engenharia, v. 26, n. 2, 15-24, 2007

STEFFENS, Cesar Augusto; VEIT, Eliane Angela; SILVEIRA, Fernando Lang. **Uma introdução ao processo de medição no ensino médio**. v. 19. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2008

FERNANDES, Wilson Donizeti; COSTA NETO, Pedro Luiz Oliveira; SILVA, José Ricardo da; **Metrologia e qualidade – Sua importância como fatores de competitividade nos processos** (UNIP) Salvador: UNIP, 2009. 12 p. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_091_615_13247.pdf> Acesso em: 9 mai. 2018.

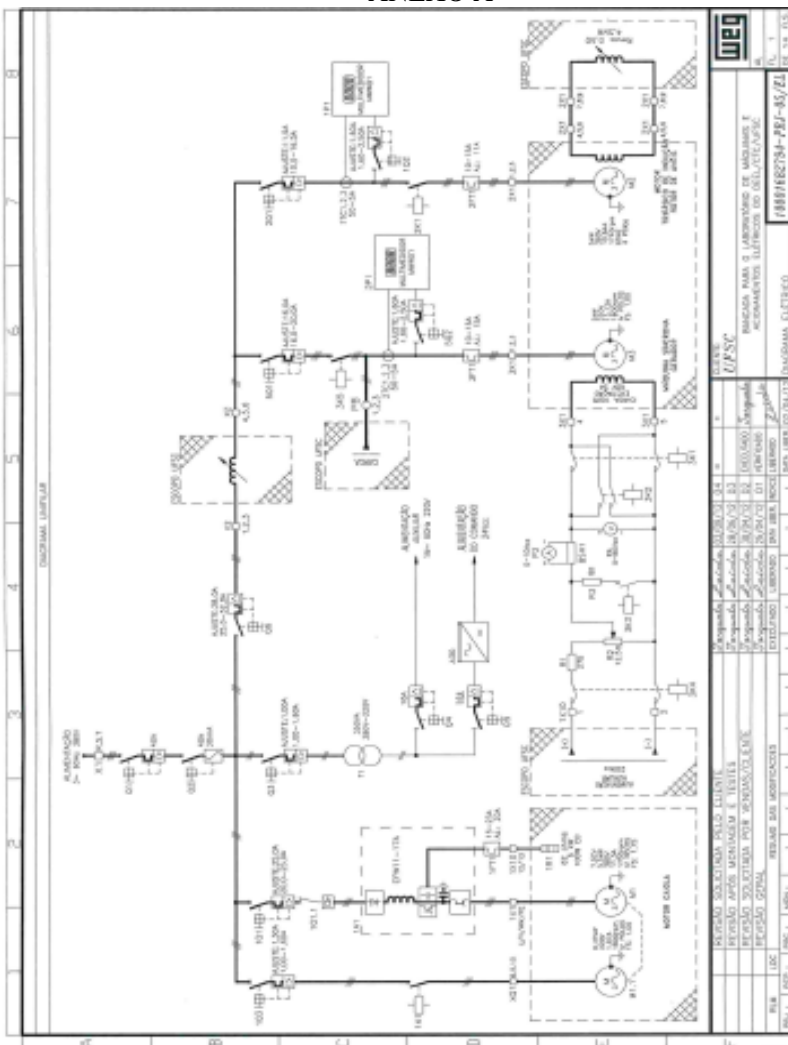
Sistema Internacional de Unidades : SI. — Duque de Caxias, RJ : INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. 94 p.

WEG. **Manual de Instalação e Operação: MMW01-M**. 2012. 38 p.

Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. 141 p.

Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais de termos associados (VIM 2012). Duque de Caxias, RJ : INMETRO, 2012. 94 p.

ANEXO A



ANEXO B

